TP de Physique Générale n°3

"Électronique" et constantes fondamentales (suite)

Frédéric Moulin et François Treussart

Poste n°4 bis Lampe de Balmer: mesure du rapport $\frac{m_e}{m_p}$.

Cette mesure repose sur la mesure du décalage isotopique. Vous disposez pour cela d'une lampe Hydrogène/Deutérium(10%) de marque *Leybold*.

Rappels théoriques

Dans le modèle de Bohr de l'atome, les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène sont donnés par:

$$E_n = -\frac{\mathcal{R}_H\, hc}{n^2} \tag{1}$$

où $\mathcal{R}_H$ représente la constante de Rydberg donnée par:

$$\mathcal{R}_H \equiv \frac{\mu_H e^4}{8\varepsilon_0 h^3 c} \tag{2}$$

avec μ_H, *masse réduite* du système à deux corps électron-noyau (proton pour l'hydrogène).

On voit immédiatement sur la relation (2), que les niveaux d'énergie d'un isotope de l'hydrogène seront décalés par rapport à ceux de l'hydrogène, dans le rapport des masses réduites, c'est à dire, pour le deutérium, dans le rapport $\frac{\mu_D}{\mu_H} \equiv \frac{(1+m_e/m_p)}{(1+m_e/2m_p)} \approx 1 - \frac{m_e}{2m_p}$

Manipulations

Vous disposez d'un Fabry-Pérot pour l'analyse spectrale et d'une caméra en sortie de l'interféromètre, qui fait l'image à l'infini.

Le principe de la mesure du décalage spectrale consiste à déterminer la périodes des anticoïncidences entre les deux raies rouges de l'hydrogène et du deutérium. Soit e cette période de déplacement du miroir mobile, le décalage relatif en longueur d'onde est alors donné par $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda}{2e}$.

- Réglez et calibrez le déplacement du miroir mobile du Fabry-Pérot à l'aide de la lampe au sodium sachant que la séparation du doublet jaune vaut 0.59 nm et que sa longueur d'onde moyenne est 589.3 nm.
- Placer un filtre interférentiel à $\lambda = 650$ nm devant la lampe de Balmer. Repérer deux anticoïncidences pour les raies de l'hydrogène et du deutérium. En déduire la séparation isotopique et le rapport $\frac{m_e}{m_p}$.

Poste n°5 Effet Photoélectrique: mesure de e/h

Historique

L'effet photoélectrique est l'effet par lequel la lumière peut arracher des électrons à la surface d'un métal.

Avant même la découverte de l'électron, W. HALBWACHS en 1886, alors étudiant de H. HERTZ avait observé qu'une plaque de zinc isolée éclairée par un rayonnement UV se charge positivement et qu'inversement, une plaque de zinc initialement chargée négativement se décharge par insolation UV, même lorsqu'elle est placée dans un vide poussée.

Suite à la découverte de l'électron par J.J. THOMSON en 1899, P. LENNARD, la même année, suggère que les observations de HERTZ et HALBWACHS correspondent à l'émission d'électrons par la surface du métal éclairée appelée *cathode*. En utilisant différentes tensions de polarisation de la cathode, LENNARD découvre *les lois fondamentales de l'effet photoélectrique*:

- L'énergie cinétique E_c des électrons émis a une valeur maximale E_c^{max} qui dépend linéairement de la fréquence du rayonnement d'insolation. L'effet photoélectrique présente un seuil en fréquence (*i.e.* le début d'émission des électrons par la cathode) qui dépend du matériau composant la cathode.

- La valeur de E_c^{max} est indépendante de l'intensité lumineuse qui détermine cependant le photocourant, *i.e.* le nombre de photons émis par unité de temps.

Rappels élémentaires

Les photons issus de la source monochromatique de fréquence ν (pour vous d'une raies spectrales du Mercure), d'énergi $h\nu$, arrachent des électrons à la cathode, et leur communique l'énergie cinétique E_c. Pour arracher ces électrons, il est nécessaire de fournir au minimum l'énergie W_0 correspondant au *travail de sortie* du matériau considéré. Le bilan d'énergie est donné par:

$$E_c = h\nu - W_0 \tag{3}$$

Expérience historique

On se propose de reprendre l'expérience de HERTZ et HALBWACHS en 1886. Une plaque de zinc fraîchement décapée est en contact avec un électroscope, et éclairée par une lampe à vapeur de mercure dont le spectre contient une forte proportion d'ultraviolet. Constater et interpréter les faits expérimentaux suivants:

- Si la plaque de zinc posée sur l'électroscope est initialement chargée négativement, elle se décharge sous l'action de l'éclairement de la lampe.

- Si l'on interpose une plaque de verre entre la lampe et la plaque de zinc, la décharge est arrêtée.

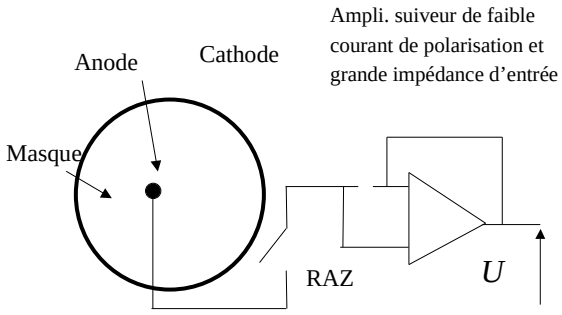
- Si la plaque est chargée positivement, aucune décharge n'est observée.

Manipulations

L'expérience que vous allez réaliser consiste à déterminer, pour différentes longueurs d'onde, le potentiel d'arrêt U des photoélectrons.

Vous disposez d'une cellule photoélectrique de marque *Pasco* de fabrication très soignée. En effet, de nombreux effets parasites peuvent fausser vos mesures, parmi lesquels l'effet photoélectrique de *l'anode*. Pour s'affranchir de ce dernier, le fabricant a placer un cache découpé en 2 fenêtres entre lesquelles se trouve l'anode ainsi protégée de l'éclairement par ce masque.

Le potentiel d'arrêt résulte de la charge d'un condensateur par le photocourant. Il est mesuré à la sortie d'un amplificateur opérationnel de très grande impédance d'entrée ($10^{12}\,\Omega$), monté en suiveur, comme l'indique le schéma ci-contre. *Il est nécessaire, pour vos mesures, de toujours attendre la stabilisation de la tension.*



- À l'aide du réseau 600 traits/mm, faites le spectre de raies d'une lampe Hg haute pression à ampoule de quartz (pour laisser passer suffisamment d'UV). Vous devez observer, dans l'ordre 1, 5 raies bien séparées (dont un doublet jaune et une raie UV n'apparaissant que par fluorescence). Reportez vous à la Table 1 pour les longueurs d'onde de ces raies.

- Placer la cellule devant l'une des raies en s'assurant que l'image de la fente tombe bien sur la cathode (faire pivoter le tube d'écrantage) et optimiser sa position en maximisant la tension d'arrêt lue avec le voltmètre digital. *Pour les raies jaune et verte, vous n'omettrez pas les filtres qui éliminent les ordres supérieurs du réseau dans l'UV.*

- Mesurer le potentiel d'arrêt pour chaque longueur d'onde. En déduire le rapport e/h. Quelle est la précision de votre mesure?

Élément	Longueur d'onde (nm)	Couleur	Intensité
Mercure (Hg)	365.02	ultraviolet	forte
	404.66	violet	faible
	435.83	indigo-violet	forte
	546.07	vert	forte
	576.96	jaune	forte
	579.07	jaune	forte

Table 1: Longueurs d'onde des principales raies du mercure

Poste n°6 Expérience de MILLIKAN

Historique

L'expérience que réalisa en 1910-1911 MILLIKAN[1], alors professeur à l'Université de Chicago, contribua à imposer l'idée que toute corpuscule chargée porte un nombre entier de *charges élémentaires* e. Elle permit aussi de réaliser la première mesure de cette charge élémentaire, charge de l'électron.

Dans l'expérience de MILLIKAN, le corpuscule faiblement chargé consiste en une gouttelette d'huile chargée positivement par frottement avec l'air,qu'on laisse tomber entre les armatures séparées d'une ditance d d'un condensateur chargé sous une ddp U.

Mouvement de chute d'une gouttelette

La goutte sphérique de rayon r, faiblement chargée de charge q, est soumise à son poids $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{huile}}\mathbf{g}$, à la force électrique $q\mathbf{E}$, à la force de frottement fluide de type STOKES $-6\pi\eta_{\text{air}} r\mathbf{v}$ ($\mathbf{v}$ étant la vitesse acquise par la goutte et η_{air} la viscosité dynamique de l'air), et enfin à la poussée d'ARCHIMÈDE $-\frac{4}{3}\pi r^3\rho_{\text{air}}\mathbf{g}$. Vous montrerez aisément que l'équation du mouvement de la goutte de masse m soumise à ces forces $m\,d\mathbf{v}/dt = \sum \mathbf{F}$ a pour solution:

$$\mathbf{v} = \frac{1}{6\pi\eta_{\text{air}} r}\left[\tfrac{4}{3}\pi r^3(\rho_{\text{huile}} - \rho_{\text{air}})\mathbf{g} + q\mathbf{E}\right]\left(1 - e^{-\frac{6\pi\eta_{\text{air}} r}{m}t}\right) \tag{4}$$

On constate que la goutte atteind rapidement une vitesse limite $\mathbf{v}_{\text{lim}}$, dès que $t \gg \dfrac{m}{6\pi\eta_{\text{air}} r}$, qui ne dépend que du rayon r de la goutte. Il découle de ce résultat différentes méthodes de mesures pour la charge de la goutte.

Méthodes de mesure de la charge de la goutte

Chaque méthodes se décompose en deux mesures permettant d'accéder d'une part au rayon r de la goutte et d'autre part à sa charge q.

Mesure dite "statique" (dénomination *Leybold*) La gouttelette est arrêtée dans sa chute et immobilisée par l'application d'une ddp U_0 entre les armatures du condensateur. Son poids et la poussée d'ARCHIMÈDE sont alors compensés par la force électrique:

$$\tfrac{4}{3}\pi r^3(\rho_{\text{huile}} - \rho_{\text{air}})\mathbf{g} = q\mathbf{E} \tag{5}$$

Si l'on cesse d'appliquer le champ électrique, la goutte reprend sa chute libre, soumise à la force de frottement fluide et atteind la vitesse limite:

$$\mathbf{v}_{\text{lim}}^{(1)} = \tfrac{2}{9}(\rho_{\text{huile}} - \rho_{\text{air}})\frac{r^2}{\eta_{\text{air}}}\mathbf{g} \tag{6}$$

Des expressions (4) et (5) on peut déduire la charge de la goutte:

$$q = K\frac{\left(v_{\text{lim}}^{(1)}\right)^{\frac{3}{2}}}{U} \tag{7}$$

[1]On doit aussi MILLIKAN une mesure de la constante de PLANCK utilisant l'effet photoélectrique !

où la constante $K \equiv 6\pi\sqrt{\frac{9}{2}}\frac{\eta_{\text{air}}^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{(\rho_{\text{huile}}-\rho_{\text{air}})g}}d$ est de l'ordre de 2×10^{-10} SI (vous vous référerez à la Table 2 pour en déterminer la valeur exacte).

Mesure dite "dynamique" Cette technique s'apparente à la précédente à part qu'on ne cherche pas à immobiliser la goutte en présence du champ électrique mais qu'on mesure par contre sa vitesse limite $\mathbf{v}_{\text{lim}}^{(2)}$ dans ces conditions, après avoir mesurée $\mathbf{v}_{\text{lim}}^{(1)}$ comme précédemment. Vous pourrez montrer alors que la charge de la goutte se déduit de ces deux vitesses limites:

$$q = K\frac{\left(v_{\text{lim}}^{(1)}+v_{\text{lim}}^{(2)}\right)\left(v_{\text{lim}}^{(1)}\right)^{\frac{1}{2}}}{U} \tag{8}$$

Remarque importante Lors de la phase ascendante de la goutte, celle-ci peut se mettre à changer brusquement de vitesse limite: ceci correspond au transfert de charges Δq avec son environnement, relié à la variation de vitesse $\Delta v_{\text{lim}}^{(2)}$, selon $\Delta q = \frac{K}{U}\Delta v_{\text{lim}}^{(2)}\sqrt{v_{\text{lim}}^{(1)}}$. C'est historiquement en recueillant les valeurs de ces changements de vitesses limites que fut réalisée l'expérience. Une statistique sur les valeurs recueillies montre que les sauts de charges sont discrets et multiples d'une charge élémentaire e.

masse volumique de l'huile ρ_{huile}	800 kg/m^3
masse volumique de l'air ρ_{air} (pression P température T)	$3,49\times10^{-3}\frac{P[\text{ Pa }]}{T[\text{ K }]}$ en kg/m^3
viscosité dynamique de l'air η_{air}	18.5×10^{-6} kg/(m.s)^2
accélération de pesanteur g	9,81 m/s^2
distance d entre les deux armatures du condensateur	6 mm

Table 2: Données numériques pour l'expérience de MILLIKAN

Manipulations

Vous suivrez les instructions en page 3 du manuel d'utilisation de l'apareil valables pour la méthode "statique", mais que vous adapterez aisément à la méthode "dynamique".

Un nombre de l'ordre de 10 à 20 mesures est nécessaire pour être convaincant. Vous représenterez par ailleurs vos résultats (valeurs des charges mesurées, ou des sauts de charges) sous la forme d'un histogramme.

Poste n°7 Expérience de Franck et Hertz: mise en évidence de la quantification des niveaux d'énergie atomique et mesure de l'énergie d'excitation du niveau 6^3P_1 du mercure

Historique et principe

Cette expérience historique, qui valu le prix Nobel à ces auteurs, fut l'une des premières expériences à mettre en évidence la quantification des niveaux d'énergie atomiques.

L'expérience est réalisée à l'aide d'une cellule contenant du mercure. Celle-ci est chauffée jusqu'à 180°C, vaporisant ainsi le mercure dans l'enceinte à une pression d'environ 25 mbar.

À l'aide d'une cathode C chauffée par un courant alternatif, on génère des électrons qui sont ensuite accélérés entre les grilles g_1 et g_2 par une tension U_2, puis ralentis par une contre-tension U_3. On mesure alors un courant extrêmement faible (de l'ordre du nA) à l'aide d'un amplificateur de courant de très haut gain.

Lorsque les électrons accélérés possèdent une énergie cinétiques suffisante pour exciter le premier niveau d'énergie des atomes de la vapeur de mercure, il cède cette énergie aux atomes et ne parviennent plus jusqu'à l'anode. Le courant mesuré présente alors un minimum local. Cette effet réapparaît de nouveau pour toute énergie d'accélération multiple de l'énergie d'excitation: un même électron pouvant alors consécutivement exciter deux atomes de mercure sur son parcours avant d'atteindre l'anode.

Manipulations

Vous disposez d'un boîtier qui fourni toutes les alimentations nécessaires au tube, et d'un amplificateur de courant à très haut gain (10^9 V/A).

Référez-vous scrupuleusement à la notice "maison" pour réaliser les connections et mettre en marche l'expérience

- Vérifier grossièrement en variant la tension d'accélération U_2 que vous observez des minima et maxima. Si c'est bien le cas, prenez une série de points en partant de $U_2 \approx 30$V. Sinon, augmentez un peu la tension continue de contrôle U_1 afin de régénérer la cathode.
- Vous pouvez aussi tracer directement, à l'aide de la table traçante XY, la tension de sortie de l'amplificateur de courant en fonction de U_2.
- Déduire de vos mesures l'énergie d'excitation du niveau 6^3P_1 du mercure.

Agrégation de Sciences Physiques

TP de physique générale
(18 mai 2000)

Liste du matériel nécessaire

- **Lampe de** Balmer
  - la lampe de Balmer + son alim
  - le Fabry-Pérot *Sopra* chariotable
  - 1 lampe Na + Alim
  - 1 condenseur
  - 1 filtre interférentiel rouge $\lambda = 650$ nm
  - la caméra N/B + zoom + moniteur
- **Expérience de** Halbwachs **et Effet photoélectrique**

  Expérience historique
  - 1 plaque de Zinc + papier de verre pour le décapage
  - 1 électroscope sur lequel est fixé la plaque de Zinc
  - 1 plaque de verre (pour faire écran à l'insolation UV)
  - peau de chat et nâton d'ébonite
  - chiffon et bâton de verre

  Expérience historique
  - la cellule photoélectrique *Pasco* + ses 2 filtres jaune et vert
  - le réseau 600 traits/mm
  - la lampe Hg HP *OSRAM* avec verre au Quartz + Alim
  - 1 condenseur
  - 1 fente règlable
  - 1 multimètre digital
  - 1 doublet $f = 100$ mm
  - 2 écrans de projection (servant de cache)

- **Expérience de** Millikan
  - Le dispositif *Eurosap*
  - 1 lampe quartz-iode
  - 1 générateur de HT
  - 1 caméra couleur *Flexcam+* écran de TV
  - 1 multimètre numérique
  - 1 chronomètre
- **Expérience de** Franck **et** Hertz
  - Un tube de Franck et Hertz + sa douille
  - Le boitier d'alimentation du tube
  - Le four
  - L'alimentation régulée du four
  - Le thermocouple pouvant supporter 1100°C et un lecteur
  - L'amplificateur de courant à haut gain
  - Un multimètre numérique
  - La table traçante X-Y (muni d'un stylo!)